مدل‌سازی آزمایشگاهی سلول‌های گیل در سازه‌های شناور بسیار بزرگ ★

علی پریزاده قوشخانه[۱] محمدجواد خانجانی[۲]

چکیده *سازه‌های شناور بسیار بزرگ وقتی به‌طور نامتقارن بارگذاری می‌شوند، اختلاف خیز سازه بین مرکز و لبه‌های آن افزایش می‌یابد. یکی از روش‌های مؤثر کاهش اختلاف خیز استفاده از سلول‌های گیل است. این سلول‌ها قسمت‌هایی از سازه هستند که نیروی شناوری در محل قرارگیری آنها حذف می‌شود. در این مطالعه با ساخت مدل آزمایشگاهی و انجام دو آزمایش مجزا رفتار آنها بررسی شده است. نتایج آزمایش استاتیکی نشان داد که استفاده از ۱۰ درصد سلول گیل در دو انتهای مدل، بهترین عملکرد در کاهش اختلاف خیز را دارند. هم‌چنین مدل دارای ۵ درصد سلول گیل با چینش L شکل متقارن در گوشه‌ها، بیشترین کاهش لنگر خمشی را داشته است. از نتایج آزمایش دینامیکی می‌توان دریافت که در مدل با ۱۵ درصد سلول گیل کم‌ترین تنش ایجاد شده است. اگرچه این سلول‌ها توانسته‌اند به‌طور قابل قبولی تنش مدل را کاهش دهند، اما جابه‌جایی سازه در برابر امواج را به‌طور کلی کاهش ندادند. از این نتیجه می‌توان دریافت که برای عملکرد بهتر سلول گیل در کاهش جابه‌جایی باید این روش هم‌زمان با سایر روش‌ها مانند استفاده از اتصالات مفصلی در طول سازه، به‌کار گرفته شود.*

واژه‌های کلیدی سازهٔ شناور بسیار بزرگ، سلول گیل، مدل‌سازی آزمایشگاهی، اختلاف‌خیز، آزمایش دینامیکی.

Gill Cells Experimental Modeling in Very Large Floating Structures

A. Parizadeh Qushkhaneh M. Javad Khanjani

Abstract *When very large floating structures unevenly is loaded in the central portion, the difference deflection between its central section and corners will increase. One effective solution for reducing the differential deflection is gill cell. These cells are compartments in the VLFS that the buoyancy forces are eliminated at their locations. In this study, to investigate the gill cells behavior, an experimental model was conducted and two separate experiments were performed. Static experiments results showed that the model with 10% of gill cells at both its ends has best performance in difference deflection reduction. Also, the model with 5% of gill cells with symmetric L-shape arrangement in its corners has highest degree of bending moment reduction. Dynamic experiments results showed that in the model with 15 percent of gill cell has been created the lowest stress. Although these cells could reduce the stress acceptability in model, generally, they did not reduce the model displacement against waves. From this result can be realized, for better performance in reducing the displacement, gill cells must be used with other methods such as hinge connection in the structure.*

Key Words Very large floating structure, Gill cell, Difference deflection, Experimental modeling, Dynamic experiment.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۵/۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۷/۱۹ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: کارشناس ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان.
ali.parizadeh22@yahoo.com

(۲) استاد، مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر، کرمان.

مقدمه

با افزایش جمعیت و گسترش شهرها، طراحان و مهندسان با کمبود زمین روبه‌رو هستند. کشورهای جزیره‌ای دارای خط ساحل طولانی به خشک کردن دریا و ایجاد خشکی در آن رو آورده‌اند. سازه‌های شناور بسیار بزرگ (VLFS) یک راه حل جایگزین برای روش سنتی استحصال زمین از دریا است. با استفاده از تکنولوژی سازهٔ شناور بدون نیاز به حجم زیاد خاکریزی در دریا می‌توان خشکی به‌وجود آورد. از این سازه‌ها می‌توان برای اهداف متفاوتی مانند فرودگاه، پل، مخازن ذخیرهٔ سوخت و موج‌شکن شناور استفاده نمود [1]. سازه‌های شناور یا پانتون‌ها (Pontoon) مانند یک صفحهٔ بزرگ روی سطح آب باقی می‌ماند. این نوع سازه‌ها اغلب برای آب‌های آرام مانند برکه‌ها، خلیج‌ها و خطوط ساحلی مناسب هستند [2]. سازه‌های شناور بسیار بزرگ می‌توانند در هر شکلی ساخته شوند. شکل مستطیلی آن به‌دلیل مسائل اجرایی بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است.

در ساخت این نوع سازه‌ها باید پاسخ هیدروالاستیک سازه را کاهش داد. در این راستا زیلمن و میلو در سال ۲۰۰۰ سازهٔ دایره‌ای شکل را مورد بررسی قرار دادند [3]. هاماموتو و فوجیتو در سال ۲۰۰۲ پانتون‌های X، C، T، L شکل و آندریانو و هرمنس در سال ۲۰۰٦ سازهٔ حلقوی را آنالیز کردند [4,5]. هم‌چنین راهکارهایی مانند نصب یک صفحهٔ کاهندهٔ حرکت (Anti motion) به ابتدای سازهٔ شناور با اشکال و زوایای مختلف [7و٦]، ساخت سازهٔ چندجزئی و اتصال آنها به‌صورت مفصلی مورد بررسی واقع شده‌اند [8,9]. علاوه بر موارد ذکرشده تحقیقات بسیاری در زمینهٔ تحلیل و طراحی سازه‌های شناور انجام گردیده؛ اما کمتر به مسألهٔ اختلاف‌خیز در آنها پرداخته شده است [10].

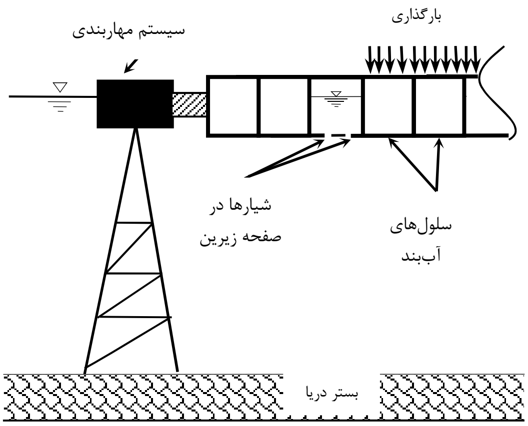
با توجه به بزرگ بودن ابعاد سطح این سازه‌ها درمقایسه با ضخامت آنها مانند صفحه عمل می‌کنند. در بارگذاری سنگین و غیریکنواخت مانند انباشت کانتینرها در وسط سازه، قسمت میانی سازهٔ شناور دچار تغییرشکل کاسه‌ای می‌شود؛ درنتیجه اختلاف جابه‌جایی عمودی بین مرکز و بخش‌های بیرونی سازه زیاد می‌شود [11]. با افزایش سختی سازه در تمام قسمت‌های شناور از طریق افزایش ارتفاع یا ضخامت صفحات بالا و پایین آن، می‌توان اختلاف‌خیز را کاهش داد. باتوجه به این‌که این راهکار روی ابعاد و شکل شناور تأثیر می‌گذارد، موجب بالا رفتن هزینهٔ ساخت می‌گردد. یکی دیگر از راه‌حل‌ها، سازهٔ شناور پله‌ای است؛ در این روش عمق سازه در قسمت‌های تحت بار افزایش و در بخش‌های بدون بار کاهش می‌یابد [12]. روش اخیر نیز به‌دلیل محدودیت اجرای چنین سازه‌ای برای بررسی کاهش اختلاف‌خیز به‌کار گرفته نشده است. در سال ۲۰۰٦ ونگ روشی برای کاهش اختلاف‌خیز پیشنهاد کرده است. ایشان با ایجاد سوراخ و شیارهایی در صفحهٔ کف شناور، اجازهٔ ورود و خروج آزادانه آب به داخل بعضی اجزا را فراهم کرد. چون جریان آزاد آب از این شیارها و سوراخ‌ها مانند آبشش‌های ماهی است، سلول‌های آبششی یا سلول گیل (Gill cell) نام‌گذاری شده‌اند [10]. زیجیان و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک ترمینال کانتینر شناور به ابعاد ۱۰×٤٧۰×۵۲۰ متر را بااستفاده از نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی کردند. آنها بااستفاده از روش اجزای محدود در مدل‌سازی با این نرم‌افزار، کاربرد سلول‌های گیل در بارگذاری استاتیکی را مورد تحلیل قرار دادند؛ [12]. ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک سازهٔ دایره‌ای‌شکل با شعاع ۲۰۰ متر و ارتفاع ۲ متر را براساس تئوری کلاسیک صفحات نازک مدل‌سازی و خیز سازه را به‌صورت تحلیلی محاسبه کردند. آنها با تغییر شعاع و مقدار بارگذاری، تأثیر تعداد سلول‌های گیل را بررسی نموده‌اند. هم‌چنین تأثیر تغییرات عمق آزاد و ضخامت صفحات بالا و پایین سازه، عملکرد سلول‌های گیل را بررسی کردند [13]. فم و ونگ در

سال ۲۰۱۰، یک روش عددی را برای بهینه‌سازی محل و تعداد سلول‌ها در شکل‌های دل‌خواه بررسی کردند. آنها براساس تئوری صفحهٔ میندلین (برای مطالعهٔ این تئوری به مرجع [14] مراجعه شود) سازهٔ شناور با بارگذاری یکنواخت در بخش مرکزی را مدل‌سازی کردند و بااستفاده از الگوریتم ژنتیک، محل و تعداد بهینهٔ سلول‌های گیل را محاسبه نمودند [15]. هم‌چنین در سال ۲۰۱۳، گااُ و همکاران با ترکیب سلول‌های گیل و اتصال مفصلی بین اجزای سازهٔ شناور، عملکرد سلول‌ها را بررسی نموده‌اند [16].

استفاده از سلول گیل برای کاهش اختلاف خیز سازه روشی کم‌هزینه و از نظر تئوری ممکن به نظر می‌رسد. اما تاکنون این راهکار با استفاده از نرم‌افزار به‌صورت عددی و تنها تحت بار گذاری ثقلی مدل‌سازی شده است. برای مشاهدهٔ عملی بودن و بررسی عملکرد سلول‌های گیل در محیط واقعی، سازهٔ شناور دارای این سلول‌ها در آزمایشگاه شبیه‌سازی شد. از آن‌جایی‌که چالش مهم در مورد این سازه‌ها به کارگیری آنها در نواحی دور از ساحل و در معرض امواج فراساحلی است. علاوه بر بارگذاری ثقلی با اعمال امواج با ۵ دوره تناوب مختلف، اختلاف‌خیز و تنش در مدل‌ها اندازه‌گیری گردید. برای این کار مدلی از جنس آلومینیوم با ابعاد ۷/۵×۵۰×۲۰۰ سانتی‌متر ساخته شد. آزمایش‌ها برای مدل بدون سلول گیل و چهار حالت مختلف چینش آنها در مدل انجام شده است. در ادامه به معرفی بیشتر سلول‌های گیل پرداخته می‌شود.

معرفی سلول‌های گیل

سازه‌های شناور بسیار بزرگ از اجزای آب‌بندی تشکیل شده است که نیروی شناوری را تأمین می‌کنند. درمقابل سلول‌های گیل قسمت‌هایی را تشکیل می‌دهند که نیروی شناوری در زیر این نواحی حذف می‌شود. نحوهٔ عملکرد این سلول‌ها به این صورت است که به‌دلیل وجود شیارها یا سوراخ‌هایی در کف سلول‌های گیل، آب می‌تواند به‌راحتی وارد آنها شود و از آن خارج شود. ارتفاع آب در داخل سلول‌ها برابر سطح تراز دریا خواهد بود. شکل (۱)، تصویر یک سازهٔ شناور دارای سلول گیل را نشان می‌دهد. با جای‌گذاری مناسب این سلول‌ها می‌توان انحنای خمش در سازه را تغییر داد و سازهٔ شناور به شکلی هموارتر درآید. باید به این نکته اشاره کرد که چون شیارها و سوراخ‌های کف سلول‌های گیل درمقایسه با ابعاد آن خیلی کوچک‌ترند، وجود آنها در سختی خمشی سازهٔ شناور تأثیرگذار نخواهد بود [12].



شکل ۱ نمایش سلول گیل در سازهٔ شناور بسیار بزرگ [12]

مدل آزمایشگاهی

معیار رفتار هیدروالاستیک در سازهٔ شناور. زمانی‌که پاسخ دینامیکی جسم شناور در اثر امواج تحلیل می‌شود، فشار ناشی از سیال بر جسم شناور باید ارزیابی شود. با جابه‌جایی جسم شناور، مایع اطراف آن نیز جابه‌جا خواهد شد؛ درنتیجه برای ارضای رابطهٔ برنولی فشار پیرامون جسم شناور تغییر خواهد کرد. از طرف دیگر با تغییر فشار، جابه‌جایی جسم نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. این‌چنین ارتباط متقابل را اندرکنش سازه و سیال شناخته می‌شود. حال اگر جابه‌جایی سازه شامل تغییرشکل‌های الاستیک آن باشد، اندرکنش سیال

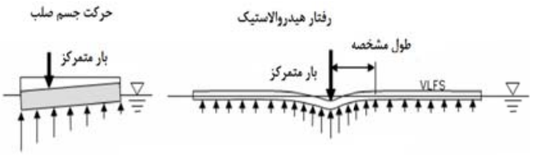
و سازه باعنوان رفتار هیدروالاستیک معرفی می‌شود. باتوجه به این‌که نسبت ابعاد افقی سازه‌های شناور بسیار بزرگ نسبت به ضخامت آن زیاد هستند؛ مانند یک صفحهٔ الاستیک رفتار می‌کنند، درنتیجه پاسخ عمودی آنها به‌طور معمول به‌صورت هیدروالاستیک درنظر گرفته می‌شود.

هر سازهٔ شناور با ابعاد بسیار بزرگ را نمی‌توان سازهٔ شناور بسیار بزرگ (VLFS) نامید و رفتار آن را هیدروالاستیک تحلیل کرد؛ بلکه باید طولی بزرگ‌تر از طول امواج و طول مشخصه (Characteristic length) داشته باشد. در سازه‌هایی با چنین ابعادی، رفتار الاستیک بر حرکت صلب آنها غالب است. در شکل (۲)، طول مشخصه به‌صورت شماتیک نشان داده شده است و مقدار آن از رابطهٔ (۱) محاسبه می‌گردد [17].

$$\lambda_c = 2\pi \left[\frac{EI}{k_c} \right]^{1/4} \quad , \quad k_c = \rho_w g\, B \qquad (۱)$$

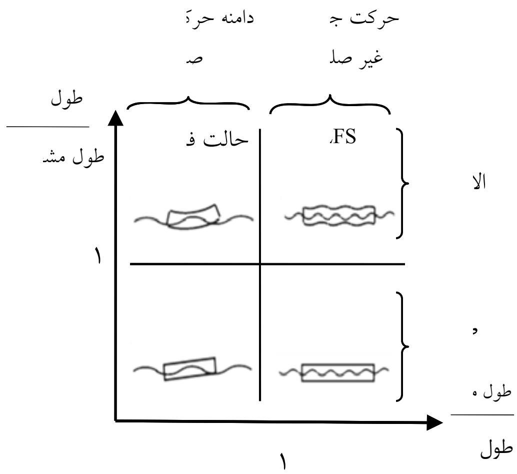
در رابطه‌های بالا EI، سختی خمشی سازه است که E، مدول الاستیسیته و I، ممان اینرسی مقطع سازه می‌باشد؛ B، عرض شناور؛ g، شتاب گرانش و ρ_w، چگالی آب است.

در رابطهٔ (۱) k_c، ثابت ارتجاعی نیروی بازگردانندهٔ هیدرواستاتیک نامیده می‌شود و λ_c، طول مشخصه؛ در واقع طولی از سازهٔ الاستیک است که تحت بار متمرکز دچار تغییرشکل موضعی ایجاد می‌شود. در شکل (۲)، طول مشخصه به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. این مفهوم نشان می‌دهد که در این نوع سازه‌ها در اثر اعمال بار، تغییرشکل الاستیک به این طول محدود می‌گردد [17]. به‌عبارت دیگر در نقطهٔ انتهای محدودهٔ طول مشخصه، تغییرشکل وجود ندارد و پس از این نقطه خط مماس بر سازه افقی خواهد بود. طول مشخصه وابسته به ویژگی‌های سازه است؛ درواقع هرچه سختی سازه زیاد یا عرض سازه کم باشد، طول مشخصهٔ سازه بزرگ‌تر خواهد بود. در حالت حدی، مثلاً حالتی که سختی سازه بسیار زیاد باشد، طول مشخصه به بی‌نهایت میل خواهد کرد. در این حالت سازه رفتاری مشابه جسم صلب خواهد داشت.



شکل ۲ مقایسهٔ رفتار یک سازهٔ الاستیک و یک سازهٔ صلب با درنظر گرفتن طول مشخصه [17]

شکل (۳)، حالت‌های مختلف رفتار یک سازهٔ شناور را باتوجه به طول موج و طول مشخصه در قالب نمودار نشان داده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد؛ درصورتی که طول موج از طول سازه بزرگ‌تر باشد، حرکت سازه به‌صورت حرکت جسم صلب خواهد بود و اگر طول مشخصه از طول سازه بیشتر باشد، تغییر شکل در سازه مانند جسم صلب می‌شود. درنتیجه برای این‌که رفتار سازه هیدروالاستیک باشد، باید طول مشخصه و طول موج از طول سازه کم‌تر باشد [17].



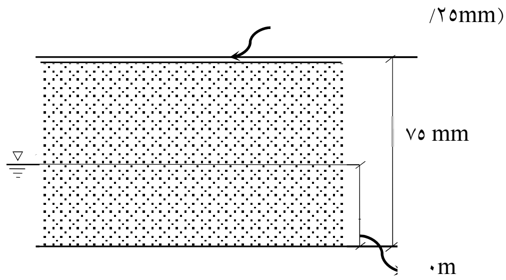
شکل ۲ بررسی حالات مختلف در سازهٔ شناور بسیار بزرگ از لحاظ رفتار صلب و الاستیک [17]

ابعاد و نحوهٔ ساخت مدل. مشخصات هندسی و سازه‌ای یک مدل باید طوری باشد که نتایج آزمایش‌ها بیانگر رفتار سازهٔ واقعی باشد. مهم‌ترین ویژگی سازهٔ شناور بسیار بزرگ رفتار هیدروالاستیک آن است. یکی از تأثیرگذارترین پارامترها در این زمینه سختی خمشی مدل است و باید به اندازه‌ای باشد که به‌طور الاستیک عمل کند [2]. برای شبیه‌سازی رفتار سازهٔ شناور از ابعاد و ویژگی‌های سازهٔ شناور واقعی دارای طول ۳۰۰ متر، عرض ۶۰ متر و سختی خمشی $۴/۷۷\times۱۰^{۱۱}$ نیوتن متر مربع استفاده شده است [15,16,18,19]. نسبت سختی خمشی در مدل و نمونهٔ واقعی به صورت زیر محاسبه می‌شود [2]:

$$EI_p=\alpha^5 EI_m \qquad (۲)$$

در رابطهٔ بالا EI_p، سختی خمشی نمونهٔ واقعی؛ EI_m، سختی خمشی مدل و α، نسبت مقیاس است.

مقیاس ۱/۱۵۰ برای ساخت مدل در آزمایشگاه انتخاب شده است. باتوجه به رابطهٔ (۲)، سختی مدل باید ۶/۲۸ نیوتن مترمربع باشد. برای تأمین این سختی، مدلی یک لایه از جنس آلومینیوم به ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر و ابعاد ۰/۵×۲ متر انتخاب گردید. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود؛ برای تأمین شناوری از پلی‌اتیلن به ضخامت ۷/۵ سانتی‌متر در زیر ورق آلومینیمی استفاده شده است. برای تأمین عمق آبخور از بار ثابت یکنواخت در کل طول مدل استفاده شده است.



شکل ۳ مقطع عرضی مدل فیزیکی ساخته‌شده از جنس آلومینیوم و پلی‌اتیلن

برای شبیه‌سازی سلول‌های گیل مانند شکل (۵) در دو سر مدل به‌طول ۴۰ سانتی‌متر حفره‌های مکعبی شکل با ابعاد ۶×۶ سانتی‌متر ایجاد شد. از آن‌جایی‌که در آزمایش‌ها باید تعداد خاصی از سلول‌ها پرآب و بقیه خالی باشند و آب از یک سلول به دیگری نفوذ نکند؛ داخل سلول‌ها با چسب آب‌بندی شدند.



شکل ۴ تصویر بخش تحتانی مدل ساخته شده دارای سلول‌های گیل به عمق ۷/۵ سانتی‌متر و ابعاد ۶×۶ سانتی‌متر در دو سر مدل

محاسبهٔ سختی و طول مشخصهٔ مدل. برای محاسبهٔ سختی خمشی مدل از آزمایش تیر یک‌سرگیردار استفاده شد. در این آزمایش یک طرف مدل با قرار دادن وزنه‌های سنگین روی آن ثابت گردید. سپس جابه‌جایی قائم سر دیگر مدل نسبت به حالت افقی تحت وزنش اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری از سنسورهای جابه‌جایی‌سنج التراسنیک دارای دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است، (شکل ۶). آزمایش برای سه طول ۴۰، ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر انجام شد. هر آزمایش ۵ بار تکرار گردید. میانگین خیز هر یک از طول‌های آزاد در جدول (۱) آورده شده است. برای محاسبهٔ سختی از رابطهٔ زیر استفاده شده است [11]:

$$y=WL^4/8EI \qquad (۳)$$

در رابطهٔ فوق W، وزن واحد طول مدل؛ L، طول بخش آزاد مدل؛ y، خیز سرآزاد و EI سختی خمشی می‌باشد.



شکل ٥ اندازه‌گیری جابه‌جایی قائم مدل در تیر یک‌سر گیردار برای محاسبهٔ سختی خمشی

با درنظر گرفتن جرم مخصوص ٢٧٠٠ کیلوگرم بر مترمکعب، برای ورق آلومینیوم، مقدار وزن واحد طول مدل 16/5 N/m محاسبه شده است. بااستفاده از رابطهٔ (٣)، مقادیر EI محاسبه و در جدول (١) آورده شده است. با میانگین‌گیری از مقادیر سختی خمشی، EI مدل برابر ٦/٥٨ نیوتن مترمربع محاسبه شده است.

جدول ١ نتایج آزمایش‌ها و محاسبهٔ سختی برای طول‌های مختلف مدل در آزمایش تیر یک‌سر گیردار

طول آزاد (cm)	خیز سرآزاد (mm)	سختی خمشی ($N.m^2$)
٤٠	٨/٩	٥/٨٩
٥٠	٢٠/٩	٦/١٨
٦٠	٣٥/٥	٧/٦٦

طبق رابطهٔ (١)، باتوجه به سختی خمشی به‌دست آمده برای مدل، مقدار طول مشخصه برابر ١/١٨ متر خواهد شد. این مقدار از طول مدل (٢ متر) کمتر است. هم‌چنین همهٔ طول موج‌های آزمایش نیز از طول مدل کمتر انتخاب شده‌اند تا رفتار آن هیدروالاستیک باشد. ویژگی موج‌ها به‌طور کامل در بخش شرح آزمایش آورده شده است.

آزمایشگاه و تجهزات اندازه‌گیری

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنآوری پیشرفتهٔ کرمان انجام شد. فلوم آزمایشگاه دارای طول ١٦ متر، عرض و ارتفاع یک متر است. عمق آب قابل تنظیم است و شرایط آزمایشگاهی را شبیه‌سازی می‌کند. دستگاه موج‌ساز توانایی ساخت موج‌های منظم و نامنظم تا ارتفاع ١٠ سانتی‌متر و پریودهای ٠/٥ تا ٤ ثانیه را دارد. از سنسورهای موج‌سنج برای اندازه‌گیری لحظه‌به‌لحظهٔ ارتفاع سطح آب استفاده شده است. دقت این سنسورها ١ میلی‌متر بوده و در هر ثاینه ١٠ داده را ثبت می‌کنند. سه عدد از این سنسورها جلوی مدل و سه عدد دیگر در پشت مدل در طرف ساحل نصب شده‌اند. شکل (٧)، نمایی از فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنآوری پیشرفتهٔ کرمان را نشان می‌دهد. در این شکل سنسورهای موج‌نگارها با نگهدارنده‌های آبی‌رنگ مشخص هستند. در انتهای فلوم یک ساحل مصنوعی به طول ٣ متر با سنگ‌هایی به ابعاد ٣ تا ٥ سانتی‌متر ساخته شده است. بدین ترتیب موج‌هایی که به انتهای کانال می‌رسند، مستهلک و از بازگشت آنها جلوگیری می‌شود، (شکل ٨).



شکل ٦ نمایی از فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنآوری پیشرفتهٔ کرمان با طول ١٦ متر، عرض و ارتفاع یک متر



شکل ۷ ساحل انتهای کانال آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنآوری پیشرفتهٔ کرمان برای مستهلک کردن امواج در انتهای کانال

برای ثبت جابه‌جایی قائم مدل بر اثر برخورد موج از سنسورهای التراسونیک استفاده شده است. این سنسورها برای برآورد فاصله، از امواج مافوق صوت استفاده می‌کنند. طرز کار آنها به این صورت است که فاصله زمانی بین ارسال امواج تا دریافت سیگنال بازگشتی را اندازه‌گیری و باتوجه به سرعت صوت در آن محیط، فاصله تا مانع را برآورد می‌کنند. داده‌های سنسورها بعد از انتقال به یک مبدل، در رایانه ثبت می‌شوند. این سنسورها دارای دقت ۰/۱ میلی‌متر است و می‌توانند هر میلی‌ثانیه جابه‌جایی قائم سطح مدل را ثبت کنند.

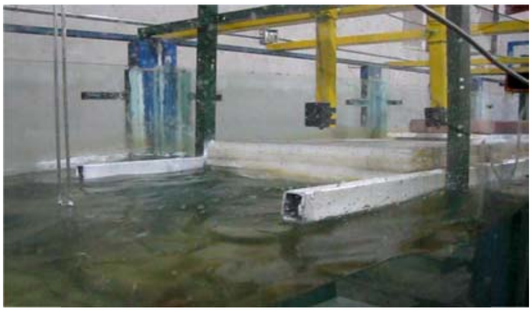
برای اندازه‌گیری کرنش در طول مدل‌ها از کرنش‌سنج دینامیکی سه‌محوره دارای شبکه‌بندی دلتا استفاده شده است. مدل کرنش‌سنج TML و نوع آن FRS-2-23 بوده است. مدل دستگاه ثبت‌کنندهٔ کرنش‌ها DC-104R است و در هر ثانیه ۱۰۰ داده مربوط به کرنش را ثبت می‌نمود. لازم به ذکر است برای بالا بردن دقت و کاهش مقاومت از سیم‌هایی با جنس نقره استفاده گردید. باتوجه به زیاد بودن طول نسبت به عرض مدل، تنش محوری در محور عرضی و تنش برشی ناچیز هستند؛ بااستفاده از رابطه‌های (٤) و (٥) ممان خمشی سطح مدل محاسبه می‌شود [2]:

$$\sigma = E\varepsilon \qquad (٤)$$

$$M = EI\varepsilon / c \qquad (٥)$$

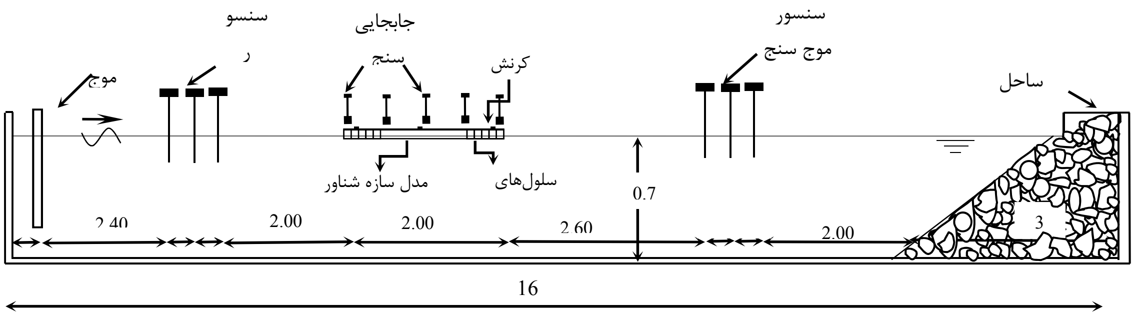
در رابطه‌های بالا M، لنگر خمشی؛ EI، سختی خمشی؛ c، فاصلهٔ تار خنثا مقطع تا دورترین تار مقطع؛ σ، تنش و ε، کرنش مدل است.

برای این‌که بتوان از حرکت افقی مدل در داخل کانال جلوگیری و در عین حال شرایطی یکسان در همهٔ آزمایش‌ها ایجاد کرد؛ از سیستم قاب مهاربندی استفاده شده است (شکل ۹). لازم به ذکر است سیستم مهاربندی از سازه فاصله داشت به‌طوری که مدل در داخل آن آزادانه حرکت می‌کرد. هم‌چنین محل برخورد لبه‌های مدل با نبشی‌ها با گریس روانکاری می‌شد. بدین ترتیب شرایط یکسانی در همهٔ آزمایش‌ها برای حرکت مدل فراهم بوده و مهاربندی در نتایج و جابه جایی‌ها تأثیرگذار نبوده است.

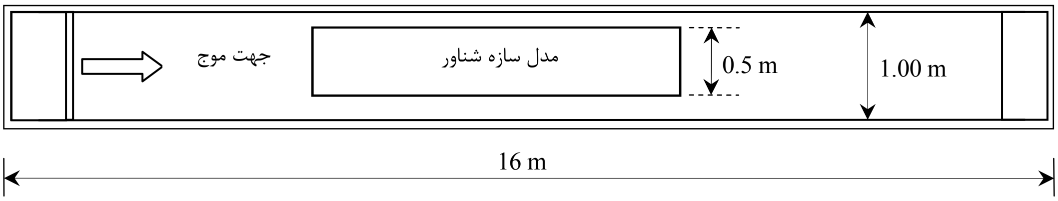


شکل ۹ سیستم مهاربندی قائم و افقی-با هدف جلوگیری از حرکت افقی مدل در برابر امواج

در شکل (۱۰)، کانال و مدل آزمایش همراه با تجهزات اندازه‌گیری به‌صورت شماتیک نشان داده شده است. شکل (۱۱)، پلان فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنآوری پیشرفتهٔ کرمان را نمایش می‌دهد.



شکل ۸ نمایش محل قرارگیری مدل و سنسورها در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنآوری پیشرفتهٔ کرمان



شکل ۹ پلان فلوم آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فنآوری پیشرفتهٔ کرمان

جدول ۲ نتایج تحلیل انعکاس امواج

طول موج (m)	۰/۷	۱/۰۰	۱/۳۰	۱/٦۰	۱/۹۰
C_r بین مدل و پارو (-)	۰/۰٦۹	۰/۰۸۵	۰/۰۹۰	۰/۱۰۵	۰/۱۱۱
C_r در ساحل فلوم (-)	۰/۰۲۹.	۰/۰۳۲	۰/۰٤۱	۰/۰٤۵	۰/۰۵۲

تحلیل انعکاس امواج

از مهم‌ترین و اوّلین مراحل بررسی پدیده‌های هیدرودینامیکی در سازه‌های دریایی بحث ترکیب امواج برخوردی و انعکاسی است. محققان زیادی از جمله تورنتون و کالن (۱۹۹۹)، گودا و سوزوکی (۱۹۷٦)، منسارد و فانک (۱۹۸۰)، بالداک و سیموندز (۱۹۹۱) روش‌های متفاوتی برای تجزیهٔ امواج برخوردی و انعکاس‌یافته به‌منظور برآورد ضریب انعکاس موج معرفی کرده‌اند [۲۰]. در این تحقیق عملیات تجزیهٔ امواج بااستفاده از روش منسارد (۱۹۸۰) به روش تحلیل طیفی انجام پذیرفته است [۲۰,21]. به این منظور از یک نرم‌افزار توسعه‌یافته در دانشگاه آالبرت دانمارک استفاده شده است. این نرم‌افزار که به نام Wave Lab شناخته می‌شود، قابلیت تجزیهٔ امواج برخوردی و انعکاسی را بااستفاده از سری‌های زمانی ثبت‌شده بین دو نقطه دارد.

براساس تحقیقات انجام شده [22] بیشترین و کمترین فاصلهٔ مجاز بین دو موج‌نگار برای رسیدن به نتایج مطلوب مطابق معادلات (٦) و(۷) می‌باشد.

$$f_{min} = \frac{\Delta x}{\lambda} = 0.05 \qquad (٦)$$

$$f_{max} = \frac{\Delta x}{\lambda} = 0.45 \qquad (۷)$$

در این روابط Δx، فاصلهٔ بین دو موج‌نگار؛ λ، طول موج و f_{min} و f_{max} به‌ترتیب مقادیر حداقل و

حداکثر نسبت می‌باشند. از آن‌جایی‌که کم‌ترین و بیشترین طول موج‌ها در آزمایش‌ها ۰/۷ و ۱/۹ متر است، فاصلهٔ ۳۰ سانتی‌متری بین موج‌نگارها برای همهٔ طول موج‌ها روابط (٦) و (٧) را ارضا می‌نماید. هم‌چنین به‌منظور صرف‌نظر نمودن از اغتشاشات سطح آب در نزدیکی مدل و پاروسنسورها باید حداقل یک طول موج از پارو و مدل فاصله داشته باشد [۲۳]. برای این منظور سنسورها در حد وسط سازه و پارو قرار گرفتند. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از تلاطم ایجادشدهٔ ناشی از بازتاب‌های چندگانه از پارو تعداد امواج تولیدشده به حدود ۱۸۰–۲۰۰ موج برای هر یک از موج‌ها محدود شد. نتایج ضرایب انعکاس برای هر یک از امواج برگشتی از پارو و ساحل انتهای فلوم در جدول (۲) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ساحل جاذب انتهای فلوم، امواج را به‌خوبی مستهلک کرده است. در جلوی سازه نیز باتوجه به ضرایب محاسبه‌شده می‌توان از اثر امواج انعکاسی در تحلیل جابه‌جایی و تنش‌های مدل صرف‌نظر نمود.

شرح آزمایش

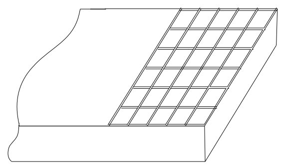
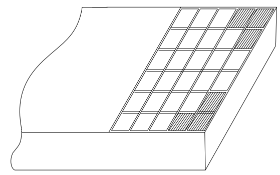
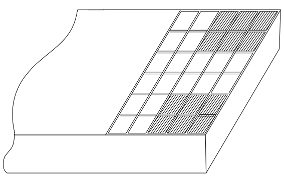
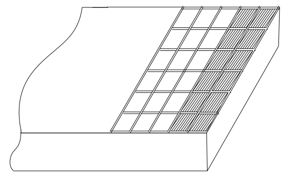
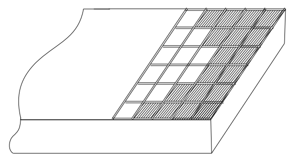
آزمایش‌ها از دو بخش بارگذاری استاتیکی و دینامیکی تشکیل شده‌اند. در بخش اول تنش و جابه‌جایی‌ها تنها تحت بارگذاری قائم بررسی شدند. بخش دوم آزمایش‌ها با اعمال موج به مدل انجام گردید. در هر دو آزمایش، بار ثابت ۲۲۰ نیوتن بر واحد سطح برای افزایش عمق مستغرق بر مدل وارد شده است. این مقدار بار در همهٔ آزمایش‌ها وجود داشته است. در هر یک از موارد فوق آزمایش‌ها ابتدا برای مدل بدون سلول گیل انجام شد، در این وضعیت امکان ورود آب به هیچ‌کدام از سلول‌ها وجود نداشت. خاطرنشان می‌کند، عمق آب در آزمایشگاه ۷۰ سانتی‌متر بوده است. برای بررسی تأثیر تعداد و نحوهٔ چیدمان سلول‌های گیل در سازه، چهار حالت درنظر گرفته شد. در زیر به توضیح بیشتر حالت‌ها و آزمایش‌ها پرداخته می‌شود.

حالت‌های مختلف مدل فیزیکی. همان‌طور که بیان شد در مدل بدون سلول گیل، هر سلول در ابتدا آب‌بند بوده و امکان ورود آب به آنها وجود نداشته است. سپس باتوجه به تعداد و نحوهٔ قرارگیری سلول‌ها در سازه با ایجاد شیار در قسمت زیرین هر سلول، امکان ورود آب به‌طور مجزا برای هر یک از سلول‌ها فراهم می‌شد. هم‌چنین برای این‌که سلول‌های گیل در ارتباط با جو باشند در هر سلول گیل یک سوراخ در صفحهٔ بالایی (صفحهٔ آلومینیومی) ایجاد شد. تا هوا داخل این سلول‌ها از سطح بالایی انتقال یابد و فشار هوای داخل سلول مانع ورود و خروج آب به آن نشود. به‌عبارت دیگر همواره آب داخل سلول گیل با سطح کانال هم‌طراز است و جابه‌جایی آب در سلول به‌صورت ثقلی خواهد بود. در حالت اول در هر طرف مدل شش سلول گیل مطابق جدول (۳)، ایجاد شد. در حالت دوم، تعداد سلول‌ها به دوازده عدد افزایش یافت و به شکل مستطیلی در گوشه‌های مدل قرار گرفت. برای حالت سوم، سلول‌های گیل در دو ردیف بیرونی شبکهٔ مشبک جای‌گذاری شدند. در حالت چهارم، چیدمان سلول‌ها مثلثی بود ولی تعداد آنها به ۱۸ عدد در هر طرف افزایش پیدا کرد.

آزمایش بارگذاری قائم (بارگذاری استاتیکی). در آزمایش بارگذاری استاتیکی پنج مرحلهٔ بارگذاری انجام شده است. در هر مرحله ۵۳ نیوتن بار در بخش میانی به حالت قبلی اضافه شد. پس از ثابت شدن نوسانات مدل و پایدار شدن مقادیر کرنش، تغییر جابه‌جایی و کرنش‌ها اندازه‌گیری گردید. یادآور می‌شود در این بخش از آزمایش موج به مدل اعمال نمی‌شد. برای کاهش خطا، هر یک از حالات مدل آزمایش‌ها در هر بارگذاری حداقل چهار مرتبه تکرار شده است. در این آزمایش جابه‌جایی قائم و کرنش‌ها در دو سر و وسط

مدل اندازه‌گیری شدند.

جدول ۳ نمایش حالت‌های مختلف چینش سلول‌های گیل

تعداد سلول‌های گیل	نحوهٔ قرارگیری سلول‌های گیل در مدل آزمایشگاهی
مدل بدون سلول گیل	
حالت اوّل، ۵ درصد سلول گیل در کل سطح	
حالت دوم، ۱۰ درصد سلول گیل در کل سطح	
حالت سوم، ۱۰ درصد سلول گیل در سطح کل	
حالت چهارم، ۱۵ درصد سلول گیل در کل سطح	

آزمایش با اعمال موج (بارگذاری دینامیکی). در آزمایش بارگذاری دینامیکی علاوه بر بار ثابت ۲۲۰ نیوتن بر واحد سطح که برای افزایش عمق مستغرق، به‌طور یکنواخت در طول مدل قرار داده شد؛ برای شبیه‌سازی بارگذاری در سازه‌های شناور، بار متمرکز ۲۰۰ نیوتن نیز در بخش میانی مدل اعمال شد. موج‌های تولید شده در آزمایشگاه از نوع سینوسی و منظم بودند. نسبت طول موج‌ها به طول سازه کمتر از یک به‌صورت ۰/۳۵، ۰/۵۰، ۰/٦٥، ۰/۸ و ۰/۹۵ انتخاب شدند. باتوجه به این‌که طول مدل دو متر است، طول موج‌ها ۷۰، ۱۰۰، ۱۳۰، ١٦۰ و ۱۹۰ سانتی‌متر می‌باشند. بااستفاده از رابطهٔ (۸) که به رابطهٔ پراکندگی (Dispersion equation) معروف است، دورهٔ تناوب موج‌ها محاسبه می‌شوند [24]:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}\tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \qquad (۸)$$

در رابطهٔ بالا h، عمق آب؛ λ، طول موج؛ g، شتاب گرانش زمین و T، دورهٔ تناوب موج است. باتوجه به رابطهٔ (۸)، دوره تناوب موج‌ها به‌ترتیب طول موج کوچک‌تر ۰/٦۷، ۰/۸۰، ۰/۹۱، ۱/۰۱ و ۱/۱۰ ثانیه محاسبه شدند. در جدول (٤) ویژگی امواج آورده شده است.

جدول ٤ ویژگی امواج اعمال‌شده بر مدل در آزمایشگاه

ویژگی موج	موج۱	موج۲	موج۳	موج٤	موج۵
نسبت طول موج به طول سازه (–) λ/L	۰/۳۵	۰/۵۰	۰/٦۵	۰/۸۰	۰/۹۵
طول موج λ (m)	۰/۷۰	۱/۰۰	۱/۳۰	۱/٦۰	۱/۹۰
پریود موج T (s)	۰/٦۷	۰/۸۰	۰/۹۱	۱/۰۱	۱/۱۰
ارتفاع موج H (cm)	۲				
زاویهٔ موج (deg) -	۹۰°				

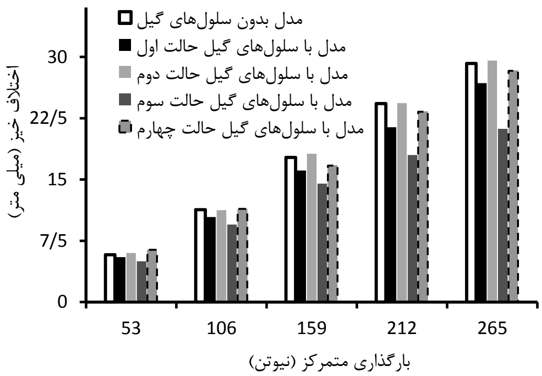
موج‌ها با ارتفاع دو سانتی‌متر در آزمایشگاه ساخته شدند و راستای آنها بر عرض مدل عمود بود. جابه‌جایی قائم در پنج نقطه به فاصلهٔ ۵۰ سانتی‌متری از یکدیگر و کرنش‌ها در دو سر و وسط مدل اندازه‌گیری شدند. برای کم کردن خطا در اندازه‌گیری و جلوگیری از تصادفی بودن داده‌ها، اعمال هر موج سه مرتبه تکرار می‌گردید.

بحث و تحلیل نتایج

نتایج آزمایش بارگذاری قائم (استاتیکی)

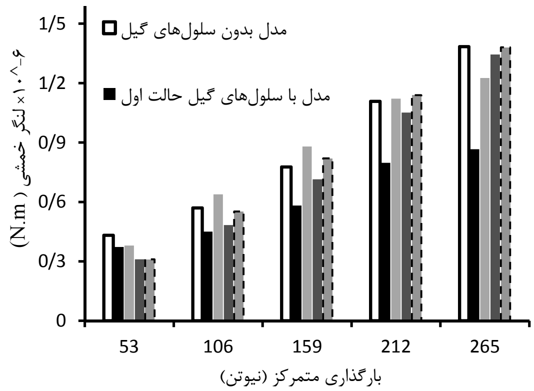
در شکل (۱۱) روند تغییرات اختلاف‌خیز بین مرکز و

لبهٔ مدل برای حالت‌ها و تحت بارگذاری‌های مختلف آورده شده است. نتایج این نمودار نشان می‌دهد که کاهش اختلاف‌خیز در بارگذاری با مقادیر کم، چشم‌گیر نبوده است. با افزایش بارگذاری اختلاف خیز در حالت سوم نسبت به سایر حالات کمتر است. در این حالت نسبت به حالت بدون سلول گیل برای بارگذاری ۵۳، ۱۰۶، ۱۵۹، ۲۱۲ و ۲۵۶ نیوتن، اختلاف‌خیز به‌ترتیب ۱۳/۸، ۱۵/۹، ۱۸/۱، ۲۵/۹ و ۲۷/٤ درصد کاهش یافته است. در این حالت دو دریف آخر به سلول گیل اختصاص داده شده است و مساحت آن ده درصد کل سازه است. بعد از حالت سوم، حالت اوّل بهترین عملکرد را داشته است. در این وضعیت در هر یک از گوشه‌های مدل سه عدد سلول گیل ایجاد شده است و در مجموع پنج درصد سطح کل را تشکیل می‌دهند. با وجود این‌که در حالت دوم نیز مانند حالت سوم، میزان سطح سلول‌های گیل ده درصد بوده است ولی چون نحوهٔ چینش آنها متفاوت بوده، عملکرد خوبی در کاهش اختلاف‌خیز نداشته است. هم‌چنین مشاهدات نشان می‌دهد در حالت چهارم که حدود ۱۵ درصد سطح کل را سلول گیل تشکیل می‌دهد؛ بهبودی در کاهش اختلاف‌خیز حاصل نشده است. می‌توان نتیجه گرفت هر چند افزایش تعداد سلول‌های گیل می‌تواند اهمیت داشته باشد، اما چینش آنها باید طوری باشد که بیشترین فاصله را از محل بارگذاری داشته باشند.



شکل ۱۰ مقایسهٔ اختلاف‌خیز مرکز و لبهٔ مدل در حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، تحت بارهای استاتیکی

کرنش مدل ساخته شده تحت بار استاتیکی در وسط و به‌دلیل تقارن فقط در یک طرف مدل اندازه‌گیری شده است. روند تغییرات لنگر خمشی وسط مدل در شکل (۱۲) نشان داده شده است. حالت اوّل یعنی قرارگیری سه سلول در هر گوشه بهترین عملکرد را در کاهش خمش در مقایسه با حالت بدون سلول گیل داشته است. درصد کاهش خمش در این حالت نسبت به حالت بدون سلول گیل برای بارگذاری ۵۳، ۱۰۶، ۱۵۹، ۲۱۲ و ۲۵۶ نیوتن به‌ترتیب ۱۳/٦، ۲۰/۹، ۲۵/۱، ۲۸/۲ و ۳۷/٤ بوده است. این اعداد تأثیرگذاری سلول‌های گیل در مقادیر بارگذاری بیشتر را تأیید می‌کند. هم‌چنین حالت سوم در رتبهٔ دوم از این لحاظ قرار دارد.

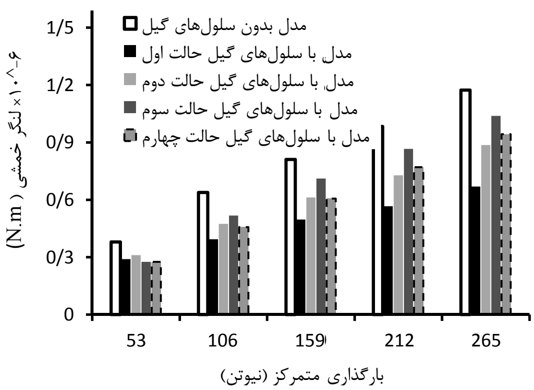


شکل ۱۱ مقایسهٔ لنگر خمشی مرکز مدل در حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها تحت بارهای استاتیکی قائم

روند لنگر خمشی در ابتدای سازه برای هر بارگذاری در شکل (۱)۳ آورده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که خمش در این قسمت از مدل در همهٔ حالات دارای سلول گیل از حالت مدل معمولی کمتر بوده است. در ابتدای مدل نیز مانند وسط آن، لنگر خمشی در حالت اوّل کاهش بیشتری نسبت به بقیهٔ حالات داشته است. حالت‌های دوم و چهارم نیز بعد از حالت اوّل کمترین خمش را داشته‌اند ولی حالت سوم با وجود این‌که از مدل معمولی لنگر خمشی کمتری داشته ولی نسبت به بقیهٔ حالات عملکرد ضعیف‌تری داشته است. در حالت اوّل نسبت به حالت بدون سلول

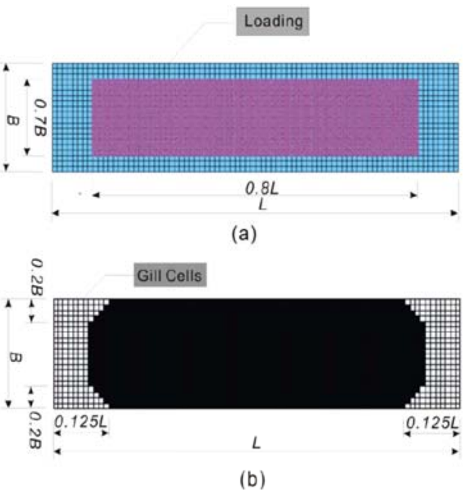
گیل در بارگذاری اوّل تا پنجم مقدار لنگر خمشی به‌ترتیب ۲۳/۶، ۳۸/٤، ۳۸/۷، ٤۲/٤ و ٤۳ درصد کاهش داشته است. از مقایسۀ این مقادیر با مقادیر مشابه لنگر خمشی وسط مدل می‌توان دریافت که لنگر خمشی در ابتدای مدل از وسط مدل بیشتر کاهش یافته است.

باتوجه به اهمیت هر کدام از پارامترهای خیز و لنگر خمشی در سازۀ شناور می‌توان هر یک از حالت‌های اوّل و سوم را انتخاب کرد. هم‌چنین باتوجه این‌که این دو حالت از بقیۀ حالات مناسب‌تر رفتار کرده‌اند، می‌توان با ترکیب آنها الگویی را پیشنهاد کرد که به‌طور نسبی خمش و اختلاف‌خیز کمتری در سازه ایجاد کند. این الگو می‌تواند شبیه حالت سوم باشد ولی دو یا چهار سلول از ردیف دوم حذف شده باشد.



شکل ۱۲ مقایسۀ لنگر خمشی ابتدای مدل در حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها تحت بارهای استاتیکی

نتایجی هم‌راستا با نتایج آزمایش در ارتباط اختلاف‌خیز در تحقیق ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ مشاهده می‌شود. آنها یک ترمینال کانتینر مربع‌شکل با سلول‌های گیل در چهار ضلع سازه و بارگذاری نامتقارن را با نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی نمودند. آنها نیز استفاده از این سلول‌ها را مؤثر دانسته‌اند، همچنین در نتایج خود –مانند مشاهدات آزمایش– ابراز می‌دارند که کارایی این روش در تعداد کانتینر بیشتر (بارگذاری بیشتر) مؤثرتر بوده است [10]. در تحقیق دیگری زیجیان در سال ۲۰۰۷ یک سازۀ طولی را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و الگوریتم ژنتیک بررسی کرده است. مکان و آرایش سلول‌های گیل را مانند شکل (١٤) گزارش نموده است [12]. چینش ارائه‌شده در شکل مذکور مشابه نتیجه‌ای است که در آزمایش‌ها به‌عنوان بهترین حالت (حالت سوم در آزمایش‌ها) شناخته شد. البته بارگذاری در آزمایش‌ها در نیمۀ میانی مدل انجام شده است که در تحقیق زیجیان در هشت‌دهم طول، مطابق شکل (a-١٤) بوده است.



شکل ۱۳ a) ناحیۀ بارگذاری، b) طرح بهینۀ سلول‌های گیل برای سازۀ شناور با L/B=4 [12]

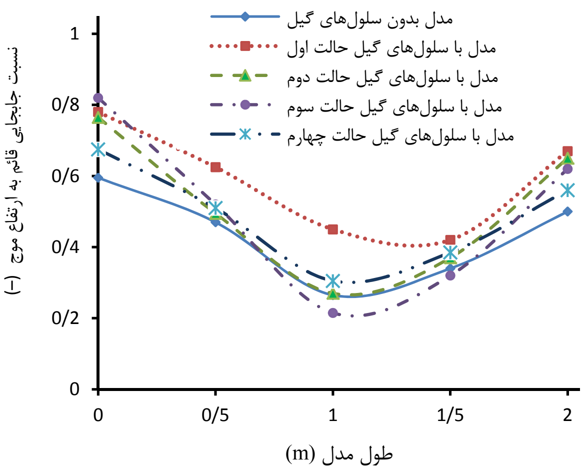
همان‌طور که در مقدمه بیان شد، محققان دیگری نیز اثر سلول گیل در سازۀ دایره و مربع شکل به صورت عددی مدل‌سازی کردند و استفاده از سلول گیل را مفید ارزیابی نموده‌اند. هر چند ابعاد و مقدار بارگذاری تحقیقات فم و همکاران با ابعاد مدل ساخته شده در آزمایشگاه متفاوت است، ولی می‌توان بررسی کارایی سلول‌های گیل که بیشتر هدف این پژوهش بوده را با تحقیقات آنها به‌طور نسبی مقایسه کرد. ایشان در مقالۀ خود با مدل‌سازی سازه با ابعاد ۲٤۰×۱۸۰ متر با روش اجزای محدود در حالت بهینه؛ کاهش اختلاف‌خیز را ۵۵٪ و کاهش تنش در مرکز سازه را ۲٤٪ اعلام نمودند [15]. این مقادیر با توجه به داده‌های آزمایشگاهی به‌ترتیب ۲۸٪ و ۳۷/٤٪ در بیشترین

بارگذاری مدل بوده‌اند. تأکید می‌شود؛ هرچند ابعاد و شکل سازه‌ها در بررسی اخیر با یکدیگر مشابه نبوده است ولی در یک مقایسهٔ نسبی، نتایج مدل آزمایشگاهی نیز عملکرد سلول گیل در سازهٔ شناور را مفید و امکان‌پذیر می‌داند.

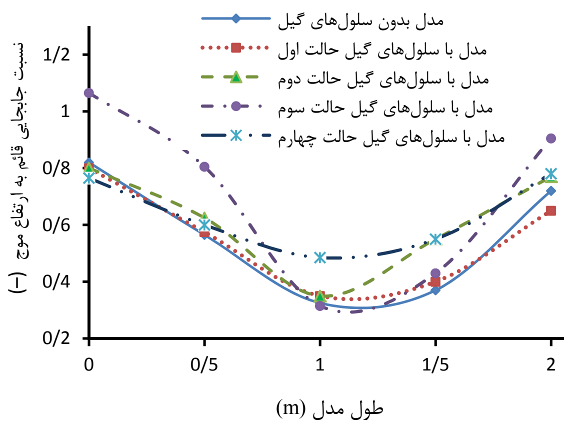
نتایج آزمایش اعمال موج (بارگذاری دینامیکی)

نسبت جابه‌جایی قائم مدل به ارتفاع موج در آزمایشگاه (۲ سانتی‌متر) در شکل‌های (۱۵) تا (۱۹) آورده شده است. در موج اوّل با دورهٔ تناوب ۰/۶۷ ثانیه، مدل دارای سلول گیل در حالت چهارم در وسط مدل از بقیهٔ حالت‌ها عملکرد بهتری داشته است، ولی در دو سر مدل فاقد سلول گیل جابه‌جایی کمتری داشته است. در دو موج با دوره تناوب ۰/۸ و ۰/۹۱ ثانیه، رفتار مدل بدون سلول گیل تقریباً مشابه با مدل دارای سلول گیل در حالت اوّل است.

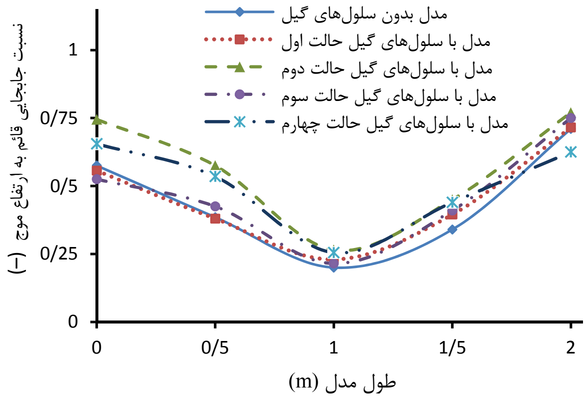
در موج با دورهٔ تناوب‌های ۱/۰۱ و ۱/۱ ثانیه (موج با طول‌های بلندتر)، مدل‌های دارای سلول‌های گیل در قسمت‌هایی از طولشان عملکرد بهتری داشته‌اند. در شکل (۱۸) حالت چهارم، جابه‌جایی را در نیمه اوّل مدل کاهش داده است. همچنین با توجه به شکل (۱۹) جابه‌جایی نیمه اوّل مدل در حالت سوم نسبت به مدل بدون سلول گیل کاهش یافته است. با دقت در نمودارها و مقایسه بین مدل‌ها، برای کل طول مدل نمی‌توان روند خاصی برای آنها پیش‌بینی کرد.



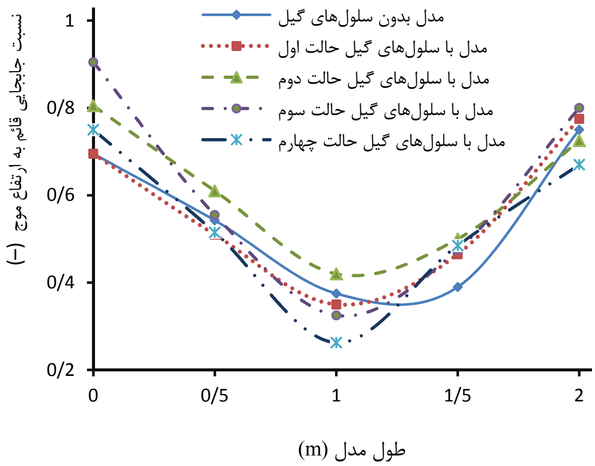
شکل ۱۴ جابه‌جایی قائم مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها در اثر برخورد موج با دوره تناوب ۰/۶۷ ثانیه



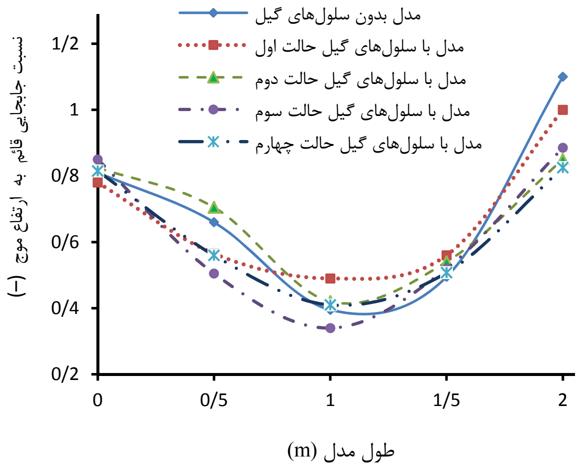
شکل ۱۵ جابه‌جایی قائم مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها در اثر برخورد موج با دورهٔ تناوب ۰/۸ ثانیه



شکل ۱۷ جابه‌جایی قائم مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها در اثر برخورد موج با دورۀ تناوب ۰/۹۱ ثانیه

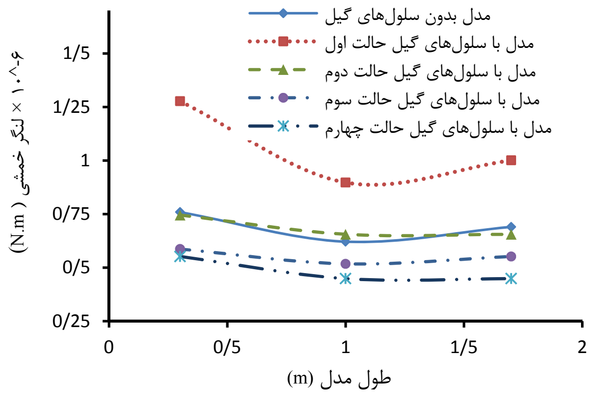


شکل ۱۸ جابه‌جایی قائم مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها در اثر برخورد موج با دورۀ تناوب ۱/۰۱ ثانیه

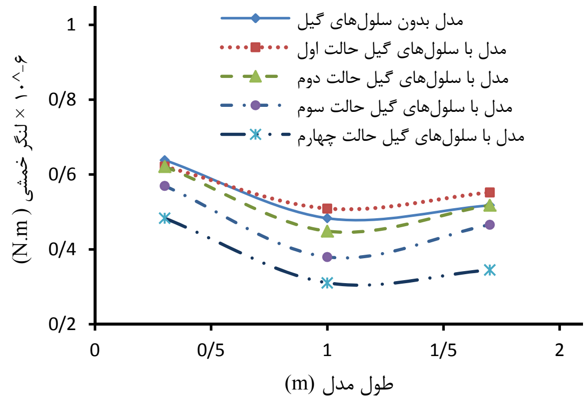


شکل ۱۹ جابه‌جایی قائم مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها در اثر برخورد موج با دورۀ تناوب ۱/۱ ثانیه

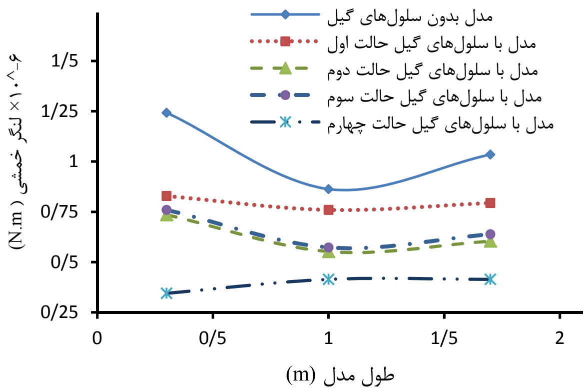
تأثیر سلول‌های گیل در تغییرات تنش در مدل سازهٔ شناور ساخته‌شده در شکل‌های (۲۰) تا (۲٤) برای موج‌های پنج‌گانه آورده شده است. روند تغییرات در این نمودارها نشان می‌دهد که کاربرد سلول‌های گیل در کاهش خمش مدل مؤثر بوده است. در اثر اعمال چهار موج اول، حالت چهارم قرارگیری سلول‌ها نسبت به سایر حالات و مدل بدون سلول گیل عملکرد بهتری داشته است. در مورد موج آخر (موج با دورهٔ تناوب ۱/۱ ثانیه)، کارکرد حالت سوم بهتر بوده و لنگر خمشی ایجادشده در آن کمتر شده است. باتوجه به این‌که کاربرد سلول گیل در آزمایش بارگذاری دینامیکی به شکل قابل قبولی تنش در سازه را کاهش داده است، برای استفاده از این روش در محیط‌های دور از ساحل باید مسألهٔ جابه‌جایی سازه را درنظر گرفت و در صورت نیاز با دیگر روش‌ها آن را کاهش داد.



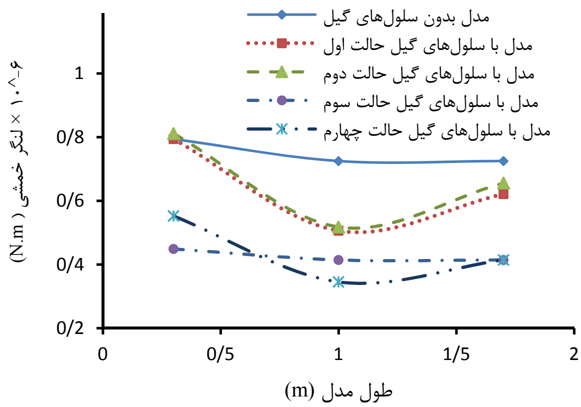
شکل ۲۰ لنگر خمشی در طول مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، در اثر برخورد موج با دورهٔ تناوب ۰/٦۷ ثانیه



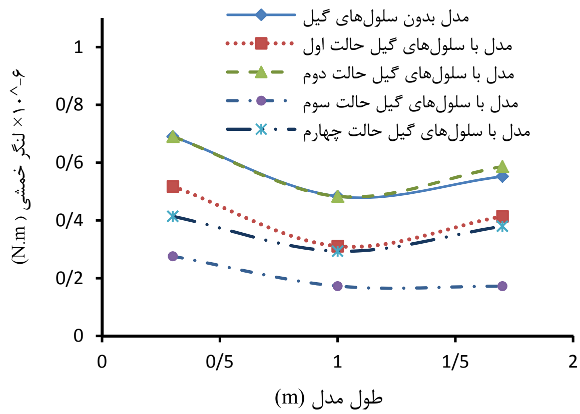
شکل ۲۱ لنگر خمشی در طول مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، در اثر برخورد موج با دورهٔ تناوب ۰/۸ ثانیه



شکل ۲۲ لنگر خمشی در طول مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، در اثر برخورد موج با دورهٔ تناوب ۰/۹۱ ثانیه



شکل ۲۳ لنگر خمشی در طول مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، در اثر برخورد موج با دورهٔ تناوب ۱/۰۱ ثانیه



شکل ۲۴ لنگر خمشی در طول مدل با حالت‌های مختلف قرارگیری سلول‌های گیل و بدون آنها، در اثر برخورد موج با دورهٔ تناوب ۱/۱ ثانیه

تاکنون تحقیقات صورت‌گرفته بیشتر در زمینهٔ بارگذاری ثقلی وارد بر سازه‌های دارای سلول گیل بوده است. مطالعات کمی در رابطه عملکرد این روش در برابر امواج انجام شده است. با این وجود در سال ۲۰۱۳ گاأ و همکاران سازه‌ای با سلول‌های گیل واقع‌شده در یک طرف آن با روش عددی مدل‌سازی نموده‌اند که خاطرنشان می‌کند نسبت طول موج به طول سازهٔ تحلیل شدهٔ آنها مشابه نسبت طول موج تولید شده به طول مدل در آزمایشگاه نمی‌باشد. باید اظهار کرد که گاأ و همکاران نیز در این تحقیق خود به‌دنبال بهبود عملکرد این روش با استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر هم‌زمان با سلول‌های گیل بوده‌اند [16].

جمع بندی

سازهٔ شناور بسیار بزرگ در صورتی که تحت بارهای استاتیکی به‌صورت غیریکنواخت قرار گیرند، نقاط زیر بار از سایر قسمت‌ها خیز بیشتری خواهند داشت. برای رفع این مشکل سلول‌های گیل پیشنهاد شده است. نفوذ آب به داخل سلول‌ها باعث می‌شود نیروی شناوری زیر آنها حذف شود و اختلاف‌خیز بین محل‌های بارگذاری‌شده و فاقد بار کاهش یابد. برای بررسی تجربی عملکرد و اثرات این راهکار مدل آزمایشگاهی این سلول‌ها ساخته شد. مدل از جنس آلومینیوم با ضخامت ۱/۲۵ میلی‌متر، طول ۲ متر و عرض ۰/۵ متر انتخاب شد. برای تأمین شناوری صفحات پلی‌اتیلن به ضخامت ۷/۵ سانتی‌متر زیر ورق آلومینیومی چسبانده شد. آزمایش‌ها برای مدل بدون سلول گیل و چهار حالت مختلف چینش این سلول‌ها انجام گرفت. دو سر مدل به طول ٤٠ سانتی‌متر به سلول‌های به ابعاد ٦×٦ سانتی‌متر تقسیم شدند.

دو آزمایش مجزا، یکی برای شبیه‌سازی شرایط محیط دریاهای آرام و خلیج‌ها و دیگری برای مدل‌سازی محیط‌های دور از ساحل که در آن امواج، نیروهای غالب هستند؛ انجام پذیرفت. در فرآیند آزمایش اوّل تنها بارگذاری قائم بر سازه اعمال شد. در آزمایش دوم با اعمال موج‌های مختلف عملکرد سلول‌های گیل در سازهٔ شناور بررسی شد. در این آزمایش‌ها جابه‌جایی و کرنش در دو سر و وسط مدل اندازه‌گیری گردید.

در آزمایش بارگذاری قائم، پنج نوع بار ۵۳، ۱۰٦، ۱۵۹، ۲۱۲ و ۲٥٦ نیوتن در وسط مدل اعمال شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که:

۱) حالت سوم چینش سلول‌های گیل، عملکرد بهتری نسبت به بقیهٔ وضعیت‌ها در کاهش اختلاف‌خیز داشته است. از این نتیجه می‌توان دریافت هر چه سلول‌ها از مرکز سازه دورتر باشند، عملکرد بهتری خواهند داشت.

۲) حالت اوّل با داشتن پنج درصد سلول گیل بیش‌ترین کاهش خمش را در ابتدا و وسط مدل داشته است.

۳) باتوجه به درجهٔ اهمیت هر یک از پارامترها خیز و لنگر خمشی می‌توان هریک از حالت‌های اوّل یا سوم را ملاک طراحی قرار داد. هم‌چنین می‌توان با ترکیب آنها الگویی پیشنهاد کرد که به‌طور هم‌زمان خمش و جابه‌جایی در سازه را کاهش دهد.

٤) تأثیرگذاری سلول‌های گیل در بارگذاری‌های زیاد بیشتر بوده است.

از آزمایش دوم (آزمایش تحت بار دینامیکی) که با اعمال پنج موج مختلف با دورهٔ تناوب‌های ۰/٦۷، ۰/۸۰، ۰/۹۱، ۱/۰۱ و ۱/۱۰ ثانیه صورت گرفت؛ نتایج زیر حاصل شد:

۱) در حالت چهارم با داشتن بیشترین سطح سلول گیل، لنگر خمشی کمتری در مدل بر اثر برخورد امواج به‌وجود آمده است.

۲) در مورد پارامتر جابه‌جایی؛ هرچند در بعضی حالات مدل دارای سلول گیل عملکرد بهتری داشته است ولی به‌طور یک روند کلی نمی‌توان گفت که کدام حالت از مدل‌های دارای سلول‌های گیل تحت

اثر موج عملکرد بهتری در کاهش جابه‌جایی داشته است.

۳) دو مشاهدهٔ فوق؛ گویای این مطلب مهم است که در صورتی جابه‌جایی یک سازه با توجه به شرایط بهره‌برداری آن در حد قابل قبول باشند، استفاده از سلول گیل برای کاهش تنش در سازه موثر خواهد بود.

٤) هم‌چنین می‌توان برای کاهش رفتار هیدروالاستیک در برابر امواج راهکار سلول‌های گیل با روش‌های دیگر مانند اتصالات لولایی، ترکیب شوند.

مراجع

1. Watanabe, E., Wang, C.M., Utsunomiya, T. and Moan, T., "Very large floating structures: applications, analysis and design", *Core report of centre for offshore research and engineering national university of Singapore*, No. 2, pp. 1-30, (2004).
2. Wang, C.M., Watanabe, E. and Utsunomiya, T., "Very Large Floating Structure", *Taylor & Francis*, New York, First Edition, pp. 141-164, (2008).
3. Zilman, G. and Miloh, T., "Hydroelastic buoyant circular plate in shallow water: a closed form solution", *Applied Ocean Research*, Vol. 22, pp. 191-198, (2000).
4. Hamamoto, T. and Fujita, K., "Wet-mode superposition for evaluating the hydroelastic response of floating structures with arbitrary shape", *Proceding of the 12th International Conferance Offshore and Polar Engineering,* pp 290–297, (2002).
5. Andrianov, A.I. and Hermans, A.J., "Hydroelastic behavior of a floating ring-shaped plate", *Journal of Engineering Mathematics,* Vol. 54, pp. 31-48, (2006).
6. Watanabe, E., Utsunomiya, T., Kuramoto, M., Ohta, H., Torii, T. and Hayashi, N., "Wave response analysis of VLFS with an attached submerged plate", *International Journal of Offshore and Polar Engineering,* Vol. 13, pp. 190-197, (2003).
7. رضایت، ز.، "مطالعهٔ آزمایشگاهی رفتار سازهٔ شناور بسیار بزرگ با اتصال صفحهٔ ضد موج"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، (۱۳۹۲).
8. Gao, R.P., Tay, Z.Y., Wang, C.M., Koh, C.G., "Hydroelastic response of very large floating structure with a flexible line connection", *Ocean Engineering*, Vol. 38, pp. 1957–1966, (2011).
9. Fu, S.X., Moan, T., Chen, X.J., Cui, W.C., "Hydroelastic analysis of flexible floating interconnected structures", *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 1516–1531, (2007).
10. Wang, C.M, Wu, T., Choo, Y., Ang, K., Toh, A., Mao, W. and Hee, A., "Minimizing differential deflection in a pontoon-type, very large floating structures via gill cells", *Marine structures*, Vol. 19, pp. 70-82, (2006).
11. Pham, D.C., "Innovation solution for minimizing differential deflection and heaving motion in very large floating structures", Ph.D Thesis, National University of Singapore, (2009).
12. Zijian, X.Y., "Very large floating container terminal and optimal layout of gill cells", M. Sc Thesis,

National University of Singapore, (2007).

13. Wang, C.M., Pham, D.C. and Ang, K., "Effectiveness and optimal design of gill cells in minimizing differential deflection in circular VLFS", *Engineering structures*, Vol. 29, pp. 1845-1853, (2007).
14. Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S. and Woinowsky, S., "Theory of Plates and Shells", Second Edition, McGraw-hill, New York, pp. 378-393, (1959).
15. Pham, D.C. and Wang, C.M., "Optimal layout of gill cells for very large floating structures", *Structural Engineering*, Vol. 136, pp. 907-916, (2010).
16. Gao, R., Wang, C.M. and Koh, C., "Reducing hydroelastic response of pontoon-type very large floating structures using flexible connector and gill cells", *Engineering Structures*, Vol. 52, pp. 372-383, (2013).
17. Suzuki, H. and Yoshida, K., "Design flow and strategy for safety of very large floating structure", Proceedings of the International Workshop on Very Large Floating Structures, pp. 21-28, (1996).
18. Chen, X., Jensen, J.J., Cui, W. and Fu, S., "Hydroelasticity of a floating plate in multidirectional waves", *Ocean Engineering*, Vol. 30, pp. 1997-2017, (2003).
19. Yago, K. and Endo, H., "On the hydroelastic response of box-shape floating structure with shallow draft", *The Society of Naval Architect of Japan*, Vol. 180, pp. 341–352, (1996).

۲۰. عبدالعلی، ع. و کلاهدوزان، م.، "مقایسهٔ روش‌های تحلیلی تجزیهٔ امواج به‌منظور محاسبهٔ ضریب انعکاس موج"، نشریهٔ مهندسی دریا، سال هفتم، شمارهٔ ۱٤، (۱۳۹۰).

21. Mansard, E.P.D and Funke, E.R., "The Measurement of incident and reflected spectra using a least squares method", *Proceedings of the 17th Coastal Engineering Conference,* pp. 154-172, (1980).
22. Goda, Y. and Ippen, A. T., "Theoretical and experimental investigations of wave energy dissipators composed of wire mesh screens", Hydrodynamics Laboratory Report, Deptement of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, *Cambridge, Massachusetts*, No. 60, 58 pages. (1963).

۲۳. حسین‌زاده، ه.، وفایی، ف. و آق تومان، پ.، "بررسی آزمایشگاهی ارتفاع بهینهٔ تیغه بر روی میزان عبور امواج از موج‌شکن‌های شناور پانتونی تیغه‌ای"، نشریهٔ مهندسی دریا، سال ششم، شمارهٔ ۱۱، (۱۳۸۹).

24. Boccotti, P., "Wave Mechanics for Ocean Engineering", Elsevier Science B.V, Amsterdam, First Edition, pp. 10-13, (2000).